

大孔径静态超光谱全偏振成像技术

李 杰^{1,2}, 朱京平¹, 齐 春², 郑传林², 高 博², 张云尧¹, 侯 洵¹

(1. 西安交通大学 电信学院 陕西省信息光子技术重点实验室 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 电信学院 信息与通信工程系, 陕西 西安 710049)

摘 要: 光谱偏振成像技术是成像光谱技术与偏振成像技术的有机融合, 是当前空间光学遥感技术研究的热点和前沿。笔者于 2010 年在国际上首先提出了一种多信息融合的静态傅里叶变换超光谱全偏振成像方法, 无运动、电控调制部件, 在探测器单次积分时间内, 可同时获取目标图像及图像上每一点的光谱、全偏振信息。同年, 又提出时空混合调制模式的无源静态共轴干涉成像光谱全偏振探测装置, 以视场光阑取代原有狭缝, 进一步扩展了仪器光通量。在上述基础上, 阐述了新方法的基本原理, 给出了具体实现方案, 推导出了新方案的调制干涉强度数据表达式及 Stokes 矢量解调公式, 分析了新方法实现光谱、全偏振探测的物理过程。研制了原理验证样机, 开展了室内、室外验证实验, 首次获得了室外推扫光谱图像“数据立方体”和全色全偏振度图像, 实验结果表明: 新方案原理正确, 技术可行。为新型空间遥感器的开发提供了基础理论及实践支持。

关键词: 成像光谱; 偏振成像; Stokes 矢量; 原理样机

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0574-05

Large aperture static hyperspectral imaging full polarimetry

Li Jie^{1,2}, Zhu Jingping¹, Qi Chun², Zheng Chuanlin²,
Gao Bo², Zhang Yunyao¹, Hou Xun¹

(1. Shaanxi Key Lab of Information Photonic Technique and Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, The School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Department of Information and Communication Engineering, The School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Spectral imaging and polarimetric imaging are both advanced optical detection techniques. In recent years, these two techniques appear new trend to merge into the imaging spectropolarimetry, and make the optical remote sensing tend to multi-dimensional and multi-information fusion. In 2010, two novel methods for measurement of the spectrum, polarization and imaging of scenes were originally proposed: one was pushbroom mode, the other was windowing mode. In this paper, the concept and theory of a sensor based on the windowing mode method were given. With specially aligned static birefringent retarders, different phase factors were modulated onto the Stokes vector of incidence light. After passing through a static birefringent interferometer, the spectrally dependent Stokes parameters were distributed into several separated interferogram channels. With corresponding Fourier-transform

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M510217); 国家自然科学基金(61205187)

作者简介: 李杰(1983-), 男, 博士后, 主要从事成像光谱、偏振成像及两者融合技术的研究。Email: jielixjtu@mail.xjtu.edu.cn

demodulation, all of the wavelength-dependent polarization, spectral and spatial imaging of objects could be completely obtained. Besides the sensor employed 2-D field of view, which meant the optical throughput was two order of magnitude higher than that of pushbroom one. The experimental demonstration of the sensor was also presented. This research gives a new way for spectropolarimetric imaging measurement, and provides theoretical and practical supports for the development of new space remote sensors.

Key words: imaging spectrometry; imaging polarimetry; Stokes vector; prototype

0 引言

光谱偏振成像技术能够同时获取目标的光谱、偏振和图像信息,是成像光谱技术与偏振成像技术的有机结合。光谱信息能够反映目标的种类、材质、物质组成及状态^[1]。偏振信息则对目标形状、表面粗糙度、电导率、含水量等材料理化特征敏感^[2-3]。

相对于传统的光学遥感手段,光谱偏振成像技术增加了信息获取量,扩展了仪器使用范围,这方面的研究已引起欧美等先进发达国家的重视,成为空间光学遥感技术研究发展的最前沿。

遗憾的是,受基础原理限制,要完整表征一束光的光谱、偏振状态,必须得到4个波长相关的Stokes参量,通常的方法是建立4个独立的方程求解这4个未知数,反映到具体探测方案上即改变不同的条件连续进行4次测量,这就造成了仪器函数须在时间尺度上(如旋转偏光元件、电控液晶位相调制器等),或空间尺度上(分振幅、分波前、分焦平面等)改变4次,从而导致仪器结构复杂,制作与装配工艺难度大,稳定性差等一系列问题,很难满足航空航天遥感的需要,已成为制约该技术发展与应用的主要障碍^[2]。为此,笔者于2010年在国际上提出了基于通道调制原理和双折射干涉的光谱偏振成像新方案,无运动、电控调制及微纳偏光部件,可同时获取目标的超光谱、全偏振图像信息^[4-5],受到了国际同行的高度评价^[6]。同年,又申请了时空混合调制模式的大孔径超光谱全偏振成像方法及装置的相关发明专利^[7],用视场光阑替代入射狭缝,进一步提高了系统光通量和信噪比。

文中在上述研究基础上,给出了时空混合调制模式的大孔径静态超光谱全偏振成像仪具体实现方案,讨论分析了新方案的技术原理,推导了新方案的调制干涉强度数据表达式及Stokes矢量解调公式,

搭建了室内验证光路,研制了原理样机,进行了室内验证及外场推扫实验。结果表明新方法可有效解决成像光谱与偏振成像技术融合存在的一系列问题,为光谱、偏振、图像同时探测提供新的技术途径。相对于文中作者提出的静态傅里叶变换超光谱全偏振成像仪,新方案光通量增加了两个数量级,信噪比提高了一个数量级。这一研究有效提高了仪器探测效率,可为具有高分辨率、高灵敏度、高稳定性等优点的新型空间光学遥感器开发提供理论与实践支持。

1 系统基本结构及探测原理

图1所示为文中提出的大孔径静态超光谱全偏振成像仪光路结构,主要由前置望远系统,位相延迟器 R_1 、 R_2 ,起偏器P,偏振分束器BS,检偏器A,二次成像系统及焦平面探测器阵列FPA组成。其中前置望远系统含有物镜、大孔径视场光阑、目镜,主要完成目标光的收集和准直, R_1 、 R_2 组成的位相调制模块对准直光进行位相调制。调制后的光通过P变为线偏振光,接着又被BS分解为两束振幅相等、振动方向互相垂直、具有一定横向剪切量,传播方向平行的线偏振光,BS可以是Savart偏光镜^[8]或者双Wollaston平行平板^[9]。两束线偏振光通过A后,振动方向变为一致,最后通过二次成像系统L汇聚到FPA上实现干涉频谱面与目标像面共面。

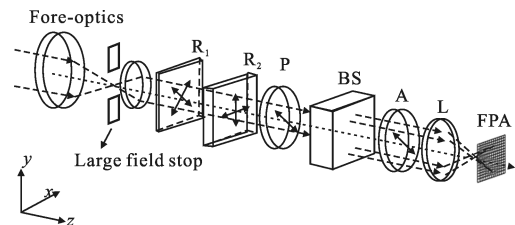


图1 大孔径静态超光谱全偏振成像仪结构示意图
Fig.1 Schematic of large aperture static hyperspectral full polarization imager

下面用穆勒矩阵来表示系统获得的干涉条纹强度:

$$I(z) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} I(z, \sigma) d\sigma \propto \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} M S_i(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_2 为入射光的波数范围; z 为偏振分束器引入的光程差; $S_i(\sigma)$ 为入射光 Stokes 矢量, $M = M_A M_{BS} M_P M_{R2} M_{R1}$ 为仪器各偏光元件偏振响应的穆勒矩阵。

将各元件穆勒矩阵的值代入公式(1)可以得到:

$$I(z) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{1 + \cos(\phi_z)}{4} \begin{bmatrix} S_0 \\ +S_0 \sin(\phi_1) \sin(\phi_2) \\ +S_2 \cos(\phi_2) \\ +S_3 \cos(\phi_1) \sin(\phi_2) \end{bmatrix} d\sigma \quad (2)$$

式中: $\phi_z(\sigma) = 2\pi\Delta z\sigma$; $\phi_1(\sigma) = 2\pi\Delta n_{oe}(\sigma)d_1\sigma$; $\phi_2(\sigma) = 2\pi\Delta n_{oe}(\sigma)d_2\sigma$; Δz 是光束通过 BS 产生的光程差; $\Delta n_{oe}(\sigma)$ 为双折射晶体的双折射率之差, d_1 、 d_2 分别是 R_1 和 R_2 的厚度。可见, 由于位相调制模块的作用, 入射光的四个 Stokes 参数被调制上了不同的位相因子。对公式(2)积分可得:

$$I(z) = \frac{1}{4} C_0(z) + \frac{1}{8} C_2(z-L_2) + \frac{1}{8} C_2^*(-z-L_2) + \frac{1}{16} C_1(z-(L_1-L_2)) + \frac{1}{16} C_1^*(-z-(L_1-L_2)) - \frac{1}{16} C_3(z-(L_1+L_2)) - \frac{1}{16} C_3^*(-z-(L_1+L_2)) \quad (3)$$

式中: L_1 、 L_2 为位相延迟器 R_1 、 R_2 引入的光程差。从公式(3)可以看出干涉条纹 $I(z)$ 被分成了七个通道(C_0 、 C_1 、 C_1^* 、 C_2 、 C_2^* 、 C_3 、 C_3^*), 其中心分别位于 $z=0$ 、 $\pm(L_1-L_2)$ 、 $\pm L_2$ 和 $\pm(L_1+L_2)$ 。对其进行傅里叶逆变换便可得到入射光的全部四个波长相关 Stokes 参数:

$$\xi^{-1}(C_1) = \frac{1}{16} S_0(\sigma) \quad (4)$$

$$\xi^{-1}(C_0) = \frac{1}{4} (S_1(\sigma) + jS_3(\sigma) \exp(j(\phi_1 - \phi_2))) \quad (5)$$

$$\xi^{-1}(C_2) = \frac{1}{8} S_2(\sigma) \exp(j\phi_2) \quad (6)$$

从物理意义上讲, 大孔径静态超光谱全偏振成像仪实现全偏振探测的机理是: 利用 R_1 、 R_2 的位相延迟特性, 将不同的位相因子分别同时调制到四个 Stokes 参数上, 再利用 BS 产生的双光束干涉数学上的傅里叶变换频移特性, 将不同的 Stokes 参数在光

程差域上分开为若干通道, 最后对兴趣通道傅里叶逆变换解调便可得到目标的光谱($S_0(\sigma)$)及全偏振信息($S_1(\sigma)$ 、 $S_2(\sigma)$ 、 $S_3(\sigma)$)其得到的数据实际上是四个波长相关 Stokes 参数“数据立方体”。

需要说明的是, 大孔径静态超光谱全偏振成像仪采用的是时空混合调制模式, 结构简单紧凑, 且无运动、电控调制部件, 这一点与笔者 2010 年提出的基于空间调制模式的静态傅里叶变换超光谱全偏振成像仪类似, 但目标二维空间像面与频谱面重合, 光谱、全偏振数据需要依靠载荷平台与目标相对运动调制每一目标点的光程差来获得, 这一点又类似于时间调制。与静态傅里叶变换超光谱全偏振成像仪相比, 优点是相同分辨率情况下, 光通量提高两个数量级, 信噪比提高一个数量级, 缺点是光谱、偏振数据需要时间调制, 这一期间如果目标发生快速变化, 则探测数据将失效。工程应用时, 应根据任务特点, 选择采用。

2 实验验证

图 2 所示为课题组研制的大孔径静态超光谱全偏振成像仪原理验证样机, 系统整体尺寸小于

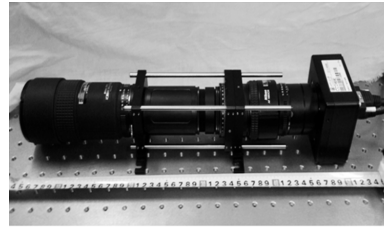


图 2 大孔径静态超光谱全偏振成像原理验证样机

Fig.2 Prototype of large aperture static hyperspectral full polarization imager

$\Phi 80 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 共轴光路结构, 质量小于 3 kg。在实验室内进行了复色无偏光与线偏振光的测量实验。图 3 为实验室构造的复色线偏振光成像验证实

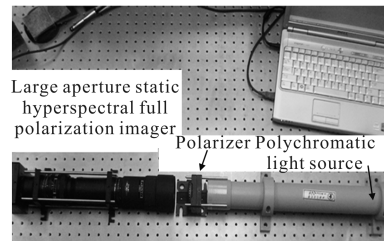


图 3 复色线偏振光成像实验

Fig.3 Setup of polychromatic polarized light test experiment

验示意图。线偏振光则由白光光源照射可旋转的线偏振片 P 产生。

图 4 为实验获取的复色线偏振光干涉强度。图 5 为解调得到的白光光谱及代表入射光全偏振状态的波长相关 Stokes 矢量,其中虚线代表理论数据,实线代表实验解调得到的数据。从图中可以发现实验与理论数据符合较好,在绝大部分波段范围内准确度优于 10%。

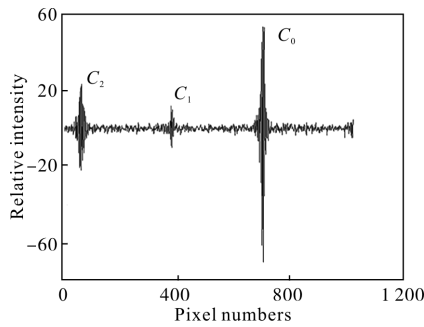


图 4 复色线偏振光(60°)成像

Fig.4 Interferogram captured by developed imager

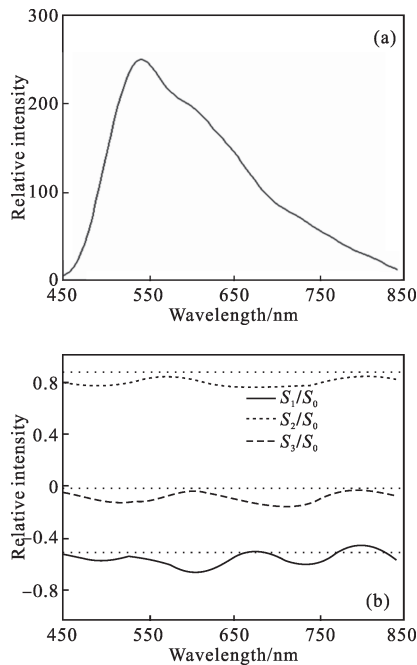


图 5 干涉图解调复原得到的入射光光谱与偏振谱信息

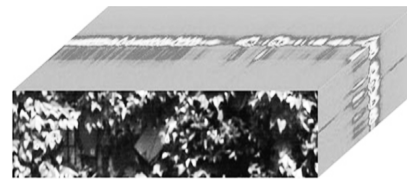
Fig.5 Demodulated spectrum and normalized Stokes parameters

图 6 为外场推扫实验装置实物图,电控转台驱动原理验证样机实现对实验场景的推扫。图 7 为获取的成像光谱“数据立方体”和代表全偏振信息的全色(450~900 nm)全偏振度图像。



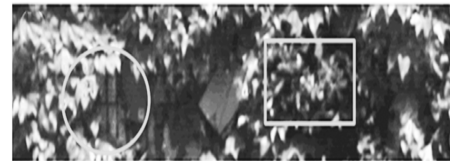
图 6 外场推扫实验装置

Fig.6 Setup of outdoor pushbroom experiment



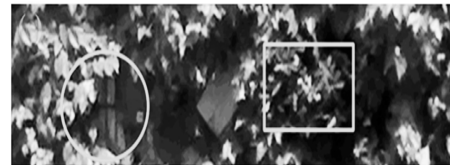
(a)光谱图像“数据立方体”

(a) Data cube obtained by developed imager



(b)光谱数据合成的真彩色图

(b) True color image constructed by spectrum data



(c)彩色数码相机照片

(c) photo taken by digital camera



(d)全色 450~900 nm 全偏振度图像

(d) 450~900 nm degree of polarization image

图 7 成像仪获取的图像效果与数码相机拍摄的真实场景对比

Fig.7 Pictures taken by developed imager vs digital camera

对比图 7(a)~(d)可见,大孔径静态超光谱全偏振成像仪外场推扫实验获得了非常好的效果。图 7(a)为成像光谱“数据立方体”,原理样机的光谱分辨率达到了 180 cm^{-1} ($3.7 \text{ nm}@450 \text{ nm}$),实现了超光谱成

像;图 7(b)为利用光谱数据合成的真彩色强度图像真实再现的实验场景,合成图的 R 通道选择在了近红外波段,使得方框中标识的人造塑料植物与周围的真植物有了明显的差别,但在图 7(c)彩色数码相机照片中,由于真假植物的颜色相近,很难进行区分;图 7(d)为全偏振度图像,圆圈区域内的墙面瓷砖与勾缝水泥由于材质及表面粗糙度有明显区别,因此在全偏振度图像中有很高的对比度,方框中假植物表面光滑,材质为塑料与真植物含水率、电导率等有明显差别,因此也被突显出来。

3 结 论

文中阐述了大孔径静态超光谱全偏振成像探测的基本原理,给出了新方法的具体实现结构,并从各结构元件的穆勒矩阵出发,推导出了新方案的调制干涉强度数据表达式及 Stokes 矢量解调公式,分析了新方法实现光谱、全偏振探测的物理过程。研制了原理验证样机,开展了室内、室外验证实验,实验结果表明新方案原理正确,技术可行,同时无运动部件、电控调制部件,无复杂的微型偏光元件阵列,相对于空间调制模式的静态傅里叶变换超光谱成像仪光通量提高两个数量级,信噪比提高一个数量级,因此在空间遥感领域有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen. Hyperspectral Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [2] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453–5469.
- [3] Hyde M W, Schmidt J D, Havrilla M J, et al. Enhanced material classification using turbulence-degraded polarimetric imagery[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3601–3603.
- [4] Li J, Zhu J P, Wu H Y. Compact static Fourier transform imaging spectro-polarimeter based on channeled polarimetry [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3784–3786.
- [5] Li Jie, Zhu Jingping. A compact, light weight interference imaging spectro-polarimeter [P]. China: ZL201010127388.3, 2010–03–18.
李杰, 朱京平. 一种轻小型干涉成像光谱全偏振探测装置 [P]. 中国: ZL201010127388.3, 2010–03–18.
- [6] Craven J. Infrared hyperspectral imaging stokes polarimeter [D]. US: University of Arizona, 2011.
- [7] Zhu Jingping, Li Jie, Huang Hua. A static passive common-path interference imaging spectropolarimeter [P]. China: 2010101273506.6, 2010–08–04.
朱京平, 李杰, 黄华. 无源静态共轴干涉成像光谱全偏振探测装置 [P]. 中国: 2010101273506.6, 2010–08–04.
- [8] Li J, Zhu J P, Hou X. Field-compensated birefringent Fourier transform spectrometer [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(5): 1127–1131.
- [9] Li J, Zhu J P, Qi C, et al. Compact static imaging spectrometer combining spectral zooming capability with a birefringent interferometer [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10182–10187.